

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局



(10) 国际公布号  
**WO 2020/237407 A1**

(43) 国际公布日  
2020 年 12 月 3 日 (03.12.2020)

(51) 国际专利分类号：  
**B25J9/00** (2006.01)

**B25J 19/00** (2006.01)

— 道德赛科技大厦 23 层 (2303-2306 室) ,  
Guangdong 5 18063 (CN) 。

(21) 国际申请号： PCT/CN20 19/088251

(74) 代理人：深圳市威世博知识产权代理事务所  
(普通合伙) (CHINA WISPRO INTELLECTUAL  
PROPERTY LLP.)：中国广东省深圳市南山区高  
新区粤兴三道 8 号中国地质大学产学研基地中  
地大楼 A806, Guangdong 518057 (CN) 。

(22) 国际申请日： 2019 年 5 月 24 日 (24.05.2019)

(25) 申请语言： 中文

(26) 公布语言： 中文

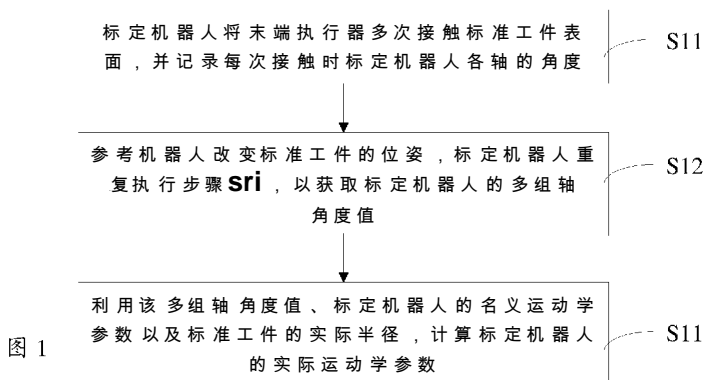
(71) 申请人：深圳配天智能技术研究院有限公司  
(SHENZHEN A & E INTELLIGENT TECHNOLOGY  
INSTITUTE CO., LTD.) [CN/CN]；中国广东省  
深圳市南山区粤海街道高新区高新南  
— 道德赛科技大厦 23 层 (2303-2306 室) ,  
Guangdong 5 18063 (CN) 。

(81) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的国家  
保护)：AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,  
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU ,  
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB ,  
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS ,  
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK ,  
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,  
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL ,  
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL ,

(72) 发明人：李康宁 (LI, Kangning)；中国广东省  
深圳市南山区粤海街道高新区高新南

(54) Title :METHOD AND SYSTEM FOR SELF-CALIBRATING ROBOT KINEMATIC PARAMETER, AND STORAGE DE-  
VICE

(54) 发明名称：机器人运动学参数自标定方法、系统及存储装置



511 A CALIBRATED ROBOT ENABLES AN END EFFECTOR TO CONTACT WITH THE SURFACE OF A STANDARD WORKPIECE FOR MULTIPLE TIMES, AND RECORDS ANGLES OF AXES OF THE CALIBRATED ROBOT DURING EACH CONTACT

512 A REFERENCE ROBOT CHANGES THE ATTITUDE OF THE STANDARD WORKPIECE; THE CALIBRATED ROBOT REPEATEDLY EXECUTES THE STEP S11 SO AS TO OBTAIN A PLURALITY OF GROUPS OF AXIS ANGLE VALUES OF THE CALIBRATED ROBOT

S11 CALCULATE THE ACTUAL KINEMATIC PARAMETER OF THE CALIBRATED ROBOT ACCORDING TO THE PLURALITY OF GROUPS OF AXIS ANGLE VALUES, THE NOMINAL KINEMATIC PARAMETER OF THE CALIBRATED ROBOT, AND THE ACTUAL DIAMETER OF THE STANDARD WORKPIECE

(57) Abstract: A method for self-calibrating a robot kinematic parameter, comprising: a calibrated robot enables an end effector to contact with the surface of a standard workpiece for multiple times, and records angles of axes of the calibrated robot during each contact, the standard workpiece being mounted on a flange of a reference robot; the reference robot changes the attitude of the standard workpiece; the calibrated robot repeatedly executes the step of enabling the end effector to contact with the surface of the standard workpiece for multiple times, and recording the angles of axes of the calibrated robot during each contact so as to obtain a plurality of



WO 2020/237407 A1

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,  
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护) :ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布 :

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

---

groups of axis angle values of the calibrated robot; and obtain the actual kinematic parameter of the calibrated robot according to the plurality of groups of axis angle values, the nominal kinematic parameter of the calibrated robot, and the actual diameter of the standard workpiece. The method can improve the efficiency, achieve automatic calibration, and make it easy to achieve batch calibration. The present invention also relates to a system for executing the method, and a storage device for storing a program file of the method.

(57) 摘要 : 一种机器人运动学参数自标定方法, 该方法包括: 标定机器人的末端执行器多次接触标准工件表面, 并记录每次接触标定机器人各轴的角度, 其中标准工件安装于参考机器人的法兰; 参考机器人改变标准工件的位姿, 标定机器人重复执行末端执行器多次接触标准工件表面, 并记录每次接触标定机器人各轴的角度步骤, 以获取标定机器人的多组轴角度值; 利用多组轴角度值、标定机器人的名义运动学参数以及标准工件的实际半径, 得到标定机器人的实际运动学参数, 可以提高效率且能够实现自动化标定, 易于实现批量标定。还涉及一种执行该方法的系统及存储有该方法程序文件的存储装置。

## 机器人运动学参数自标定方法、系统及存储装置

**【技术领域】**

本申请涉及机器人领域，尤其是涉及一种机器人运动学参数自标定方法、系统及存储装置。

**【背景技术】**

机器人的运动精度对于工业机器人在生产中的应用可靠性起着至关重要的作用。机器人各连杆的几何参数 (DH 参数) 误差是造成机器人系统误差的主要环节，其主要是由于制造和安装过程中产生的连杆实际几何参数与理论参数值之间的偏差造成的。

常用的机器人 DH 参数标定方法有两种：一种是利用激光跟踪仪或三坐标测量机等外部测量设备，测量被标定机器人 TCP 点在各测量点的位姿，根据实际测量位姿和使用机器人名义 DH 参数正解得到的理论测量位姿的误差，辨识 DH 参数的误差。但是，由于激光跟踪仪等大型高精度测量设备具有成本高、体积大的特点，所以难以满足机器人批量生产时需要为提高效率多台同时进行标定的需求。

另一种方法是使用标准工件的自标定方法，机器人法兰上安装机床测头，特制标定标准工件为三个固定在底座上的标准球，标定过程中，控制机器人，使机床测头碰触各标准球的表面多次，改变标准球工件底座的位姿，重复以上测量过程，根据测量得到的轴位置和运动学正解计算出名义 DH 参数下标准球表面测量点的笛卡尔位置坐标，并通过球面拟合拟合出多组球心，并计算理论球心的距离。利用计算出的理论球心距离和实际球心距离的误差标定出 DH 参数。然而，带有三个标准球的订制工件作为自标定中的固定物理约束，需要高加工精度的标准工件，且需要另配调整工件位姿的方案，所以增加了成本和降低了自动化程度。

**【发明内容】**

本申请提出一种机器人运动学参数自标定方法、系统及存储装置，能够降低成本且能够实现自动化标定，易于实现批量标定。

为了解决以上问题，本申请提出了一种机器人运动学参数自标定方法，包括：标定机器人将末端执行器多次接触标准工件表面，并记录每次接触所述标定机器人各轴的角度，其中所述标准工件安装于参考机器人的法兰；所述参考机器人改变所述标准工件的位姿，所述标定机器人重复执行以所述末端执行器多次接触标准工件表面，并记录每次接触所述标定机器人各轴的角度步骤，以获取所述标定机器人的多组轴角度值；利用所述多组轴角度值、所述标定机器人的名义运动学参数以及所述标准工件的实际半径，得到所述标定机器人的实际运动学参数。

为了解决以上问题，本申请还提出了一种机器人运动学参数自标定系统，包括：标定机器人和参考机器人；所述标定机器人的法兰安装有末端执行器，所述参考机器人的法兰安装有标准工件；所述参考机器人用于改变所述标准工件的位姿；所述标定机器人用于执行指令以实现如上所述的机器人运动学参数自标定方法。

为了解决以上问题，本申请又提出了一种存储装置，内部存储有程序文件，其特征在于，所述程序文件被执行以实现如上所述的机器人运动学参数自标定方法。

区别于现有技术，本申请的实施例中，利用法兰上安装有标准工件的参考机器人辅助标定，标定工具简单，效率高，且在标定时，只需一次输入标定机器人和参考机器人的运动指令，标定过程中标定机器人和参考机器人即可以自动运动和计算，无需人工干预，所以标定自动化程度高，适用于机器人生产过程中大批量的标定需求。

**【附图说明】**

图 1 是本申请机器人运动学参数自标定方法第一实施例的流程示意图；

图 2 是图 1 所示方法的执行场景示意图；

图 3 是图 1 中步骤 S11 和 S12 的具体流程示意图；

图 4 是图 1 中步骤 S13 的具体流程示意图；

图 5 是本申请机器人运动学参数自标定方法第二实施例的流程示意图；

图 6 是图 5 中各步骤的具体流程示意图；

图 7 是本申请机器人运动学参数自标定系统第一实施例的结构示意图；

图 8 是本申请机器人运动学参数自标定系统第二实施例的结构示意图；

图 9 是本申请存储装置一实施例的结构示意图。

## 【具体实施方式】

下面结合附图和实施例对本申请进行详细说明。

如图 1 所示，本申请机器人运动学参数自标定方法第一实施例包括：

S11：标定机器人将末端执行器多次接触标准工件表面，并记录每次接触时标定机器人各轴的角度。

其中，该末端执行器安装于标定机器人的法兰，标准工件安装于参考机器人的法兰。机器人各轴的角度是指机器人各关节以各关节轴线为转轴转动的角度。

结合图 1 和图 2 所示，在一个应用例中，标定机器人 A 的法兰安装有末端执行器 10，参考机器人 B 的法兰安装有标准工件 20，为了使得标定机器人 A 可以接触到标准工件 20 表面的不同位置，该标定机器人 A 和参考机器人 B 相对设置，从而使得标定机器人 A 和参考机器人 B 的灵巧工作空间有较大的重合，也就是使得二者机械臂的移动空间重合度较大，例如重合度达到至少 50%。其中该末端执行器 10 可以是如图 2 中的机床侧头，为了满足标定精度的要求，机床测头可以选用重复精度  $\mu\text{m}$  及以下的型号，标准工件 20 可以采用标准球工件，该标准球工件需要有较高的球面度和表面光滑度，例如三坐标检具标准球。

标定时，参考机器人 B 控制其机械臂，使得标准工件 20 的位姿为  $C_i$ ，标定机器人 A 控制其机械臂，可以使得末端执行器 10 多次接触标准工件 20 的表面，且每次接触均记录标定机器人 A 各轴的角度。其中，由标定机器人 A 自身的控制器（图未示）在末端执行器 10 触碰标准工件 20 的表面后记录该标定机器人 A 各轴的角度，当然也可以由标定机器人 A 将其各轴的角度传输给外部设备或生成相关文件进行存储记录。

可选地，如图 3 所示，步骤 S11 具体包括：

S11：标定机器人的末端执行器以不同姿态接触标准工件表面的不同位置 m 次，并记录每次接触标定机器人各轴的角度。

本实施例中，标定机器人为链式机器人。链式机器人可以由关节-连杆-关节-连杆-...-连杆-末端执行器这样的结构式来描述。DH 参数（Denavit-Hartenberg parameters）是由 Denavit 和 Hartenberg 在 1955 年提出的表达相邻关节及其之间的连杆的位置角度关系的机械臂数学模型和坐标系确定系统的四个参数。

由于链式机器人每个连杆对应的 DH 参数的个数为 4，为了较为准确地标定机器人的运动学参数 DH 参数，标定机器人 A 接触同一位姿的标准工件 20 的次数 m 应大于 4，例如预设  $m=8$ 。

具体地，结合图 2 和图 3 所示，为了提高标定的准确度，标定机器人 A 控制末端执行器 10 接触标准工件 20 时，可以采用不同的姿态接触标准工件 20 表面的不同位置，且每次接触时，记录标定机器人 A 各轴的角度 %。例如，末端执行器 10 每次接触标准工件 20 表面的位置均不同，且均是以不同位姿进行接触，或者部分次数采用不同位姿接触标准工件 20 表面的相同位置。

S12：参考机器人改变标准工件的位姿，标定机器人重复执行步骤 S11，以获取标定机器人的多组轴角度值。

具体地，为了获取更充分的数据，参考机器人可以多次改变标准工件的位姿，每次改变位姿后，标定机器人可以重复执行上述步骤 S11，从而可以得到标

准工件的不同位姿对应的标定机器人的各轴的角度，其中标准工件的同一位姿下记录得到的标定机器人的各轴的角度形成一组轴角度值，则可以获取标定机器人的多组轴角度值，以便后续计算标定机器人的实际运动学参数，即实际 DH 参数。

结合图 2 所示，该参考机器人 **B** 可以控制其机械臂移动，从而改变标准工件 20 的位姿，例如从位姿  $C_1$  改变为位姿  $C_2$ ，然后标定机器人 **A** 可以重复执行步骤  $S_{11}$ ，即控制末端执行器 10 多次接触标准工件 20 表面的不同位置，进而可以得到标准工件的位姿  $C_1$  和位姿  $C_2$  分别对应的两组标定机器人的轴角度值。

可选地，如图 3 所示，步骤  $S_{12}$  包括：

$S_{121}$ ：判断参考机器人改变标准工件的位姿的次数是否大于  $(n-1)$ 。

其中，为了充分获取标定数据，根据标定机器人的轴数和每个轴的 DH 参数个数，选取  $n$  的具体取值。例如，当标定机器人是六轴串联机器人时， $n$  的取值应大于 20，如  $n=60$ 。

若判断结果为不大于，则执行如下步骤  $S_{122}$ ，否则执行步骤  $S_{124}$ 。

$S_{122}$ ：改变标准工件的位姿，并返回执行步骤  $S_{11}$ 。

$S_{124}$ ：根据获取的  $n \times m$  组标定机器人各轴的角度，继续执行步骤  $S_{13}$ 。

具体地，在一个应用例中，参考机器人使用一个计数装置，当其每次控制机械臂改变标准工件的位姿时，该计数装置计数一次，则该参考机器人每次改变标准工件的位姿之前，可以先判断参考机器人已经改变标准工件的位姿的次数是否达到要求，即已经改变次数是否大于  $(n-1)$  (如是否大于 50)，也就是判断是否已经完成标准工件  $n$  个位姿下测量得到多组标定机器人各轴的角度。若改变次数小于  $(n-1)$ ，此时可以继续执行步骤  $S_{122}$ ，改变标准工件的位姿，并返回执行步骤  $S_{11}$ ，获取该改变后的标准工件位姿对应的标定机器人多次接触标准工件表面的各轴的角度。若改变次数已经大于  $n$ ，即标准工件的位姿的改变次数已经达到要求，此时标定数据已经充分获取，可以继续执行后续步骤  $S_{13}$ 。

$S_{13}$ ：利用该多组轴角度值、标定机器人的名义运动学参数以及标准工件的

实际半径，计算标定机器人的实际运动学参数。

其中，标准工件采用标准球工件，其实际半径可以预先获取，该标定机器人的名义运动学参数通常出厂时以预先设定，也可以预先获取。

具体地，利用机器人运动学正解和逆解，采用 DH 建模方法，可以预先建立该多组轴角度值、标定机器人的名义运动学参数、标准工件的实际半径以及标定机器人的实际运动学参数的关系方程，从而将已经获取的该多组轴角度值、标定机器人的名义运动学参数以及标准工件的实际半径代入已经建立的关系方程中，求解该关系方程，则可以计算得到标定机器人的实际运动学参数。

可选地，如图 4 所示，步骤 S13 包括：

S131：利用该多组轴角度值和标定机器人的名义运动学参数，计算得到每组轴角度值对应的末端执行器与标准工件表面的接触点理论位置。

机器人运动学正解指的是已知机器人各轴角度，利用机器人的名义运动学参数（即名义 DH 参数），求解机器人法兰中心在笛卡尔空间机器人基坐标系下的位姿的过程。当法兰上安装有末端执行器时，只需要对求解出的法兰中心在机器人基坐标系下的位姿进行简单的坐标转换即可以得到末端执行器在机器人基坐标系下的位姿。因此，利用获取的标定机器人的多组轴角度值和名义 DH 参数，根据机器人运动学正解，可以计算得到每组轴角度值对应的标定机器人末端执行器的工具中心点（即 TCP 点）在机器人基坐标系下的位姿。由于计算过程中采用的是名义 DH 参数，因此计算得到的 TCP 点在机器人基坐标系下的位姿是末端执行器与标准工件表面的接触点在机器人基坐标系下的理论位姿，从该理论位姿可以得到末端执行器与标准工件表面的接触点在机器人基坐标系下的理论位置。

具体地，当获取的标定机器人的多组轴角度值包括  $n$  个标准工件位姿对应的  $n*m$  组标定机器人各轴的角度时，可以根据机器人运动学正解，计算得到  $n$  组接触点的理论位置，每个标准工件位姿对应一组接触点的理论位置，每组接触点的理论位置包括  $m$  个接触点的理论位置，其中该接触点的理论位置是接触



点在机器人基坐标系下的理论位置。

S132: 利用多组接触点理论位置，拟合得到每组接触点理论位置对应的标准工件的拟合半径。

具体地，当标准工件是标准球工件时，利用计算得到的多组接触点的理论位置，采用球面拟合算法可以拟合得到每组接触点的理论位置对应的标准工件的拟合半径，一组接触点的理论位置可以拟合得到一个标准工件的拟合半径。

S133: 根据该拟合半径以及实际半径之间的拟合半径误差计算实际运动学参数。

其中，标准工件的实际半径在选择使用的标准工件后即可预先得到，利用该拟合半径和实际半径之间的差，则可以得到拟合半径误差。

由于拟合采用的原始数据是接触点的理论位置，而接触点的理论位置是采用名义 DH 参数计算得到的，因此拟合得到的拟合半径与实际半径之间的拟合误差与 DH 参数误差之间存在对应关系，利用该对应关系，则可以计算得到该 DH 参数误差，即实际运动学参数（实际 DH 参数）与名义运动学参数（名义 DH 参数）之间的运动学参数误差。然后，由于标定机器人的名义 DH 参数可以事先得到，利用该名义 DH 参数叠加该运动学参数误差，则可以得到标定机器人的实际 DH 参数。

本实施例中，利用法兰上安装有标准工件的参考机器人辅助标定，标定工具简单，效率高，且在标定时，只需一次输入标定机器人和参考机器人的运动指令，标定过程中标定机器人和参考机器人即可以自动运动和计算，无需人工干预，所以标定自动化程度高，适用于机器人生产过程中大批量的标定需求。

如图 5 所示，本申请机器人运动学参数自标定方法第二实施例是在本申请机器人运动学参数自标定方法第一实施例的基础上，进一步限定步骤 S133 之前，包括：

S201: 建立接触点的位置误差与运动学参数误差之间的第一线性关系方程。

其中，由于接触点的理论位置是利用名义运动学参数计算得到的，因此接

触点的位置误差是由于运动学参数误差导致的，可以建立接触点和位置误差与运动学参数误差之间的第一线性关系方程。

由于线性关系方程可以采用矩阵等式进行表达，求解矩阵等式即可以方便快捷地求解出线性关系方程的解，因此，如图6所示，步骤S201可以包括：

S2011：将接触点的理论位置和实际位置的差作为元素，建立接触点的位置的误差矩阵。

其中，接触点的理论位置是接触点在机器人基坐标系下的理论位置，接触点的实际位置是接触点在机器人基坐标系下的实际位置。

根据机器人的正解  $P_{ij} = f(q_i, DH_n)$ ，其中  $P_{ij}$  为机器人末端执行器的位置， $q_i$  为机器人各轴的角度， $DH_n$  为名义 DH 参数。利用记录得到的标定机器人多组各轴角度值，可以得到在名义 DH 参数  $DH_n$  下，标定机器人的末端执行器与标准工件表面的接触点的理论位置  $p'_{ij}$ 。假设接触点的实际位置为  $p_{ij}$ ，则该接触点的理论位置  $p'_{ij}$  和实际位置  $p_{ij}$  的差为  $\Delta p_{ij} = p'_{ij} - p_{ij}$ ，然后，将接触点的理论位置和实际位置的差作为元素，则可以建立接触点的位置的误差矩阵  $\Delta p = (\Delta p_{11} \ \dots \ \Delta p_{nm})^T$ ，其中  $n$  为记录标定机器人各轴的角度时采用的标准工件的  $n$  个位姿，标准工件的每个位姿对应标定机器人各轴的角度  $q_i$  的  $m$  个记录位置。

S2012：将名义运动学参数和实际运动学参数的差作为元素，建立运动学参数的误差矩阵。

假设实际 DH 参数为  $DH_a$ ，获取的标定机器人的名义 DH 参数为  $DH_n$ ，由于机器人的 DH 参数有多个，因此  $DH_a$  和  $DH_n$  均可以采用矩阵方式表示，可以建立标定机器人的运动学参数的误差矩阵  $\Delta DH = DH_n - DH_a$ 。

S2013：获取接触点的理论位置关于运动学参数的第一雅格比矩阵。

具体地，雅各比矩阵是由一阶导数构成的矩阵，则接触点的理论位置关于运动学参数的第一雅格比矩阵  $J_{DH}$  可以表示如下：

$$J_{DH} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{11}}{\partial DH_1} & \dots & \frac{\partial x_{11}}{\partial DH_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial z_{nm}}{\partial DH_1} & \dots & \frac{\partial z_{nm}}{\partial DH_k} \end{bmatrix}$$

其中， $k$  为可辨识的 DH 参数个数，其具体取值与标定机器人的轴数相关。本实施例中采用六轴串联机器人时，由于第一轴的四个相关参数不可辨识， $k$  可以等于 20。 $x_{11} \dots z_{nm}$  是利用记录的轴角度值通过名义 DH 参数正解后得到的接触点的理论位置的坐标； $DH_1 \dots DH_k$  是名义 DH 参数。

S2014: 建立如下公式 (1) 所示的第一线性关系方程：

$$A_p = J_{dh} ADH \quad (1)$$

具体地，根据机器人的运动学原理，可以推导出 DH 参数误差和接触点的位置误差存在如上述公式 (1) 所示的近似线性关系。其中， $A_p$  表示接触点的位置的误差矩阵， $J_{DH}$  表示第一雅格比矩阵， $ADH$  表示运动学参数的误差矩阵。

S202: 建立标准工件的拟合半径误差与接触点的位置误差之间的第二线性关系方程。

其中，由于标准工件的拟合半径是利用接触点的理论位置拟合得到的，因此标准工件的拟合半径误差是由于接触点的位置误差导致的，可以建立标准工件的拟合半径误差与接触点的位置误差之间的第二线性关系方程。

由于线性关系方程可以采用矩阵等式进行表达，求解矩阵等式即可以方便快捷地求解出线性关系方程的解，因此，如图 6 所示，步骤 S202 可以包括：

S2021: 将标准工件的拟合半径与实际半径之差作为元素，建立标准工件的拟合半径误差矩阵。

具体地，当标准工件采用标准球工件时，利用多组接触点的理论位置进行球面拟合，即可以得到多个该标准工件的拟合半径  $r_i$ ，而该标准工件的实际半径  $r$  在选取标准工件时即可以预先得到，则将多组拟合半径  $r_i$  和实际半径  $r$  之差  $\Delta r_i = r_i - r$  作为元素，可以建立标准工件的拟合半径误差矩阵  $A_r = (A_{r_1} \dots A_{r_n})^T$ ， $n$  为记录标定机器人各轴的角度时采用的标准工件的  $n$  个位姿。

S2022: 获取标准工件的拟合半径关于接触点的理论位置的第二雅格比矩阵。

具体地，雅各比矩阵是由一阶导数构成的矩阵，则标准工件的拟合半径关于接触点的理论位置的第二雅格比矩阵  $J_p$  可以表示如下：

$$J_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x_{11}} & \dots & \frac{\partial r_1}{\partial z_{nm}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_n}{\partial x_{11}} & \dots & \frac{\partial r_n}{\partial z_{nm}} \end{bmatrix}$$

其中， $r_1 \dots r_n$  是拟合得到的拟合半径； $x_{11} \dots z_{nm}$  是利用记录的  $n \times m$  组轴角度值通过名义 DH 参数正解后得到的接触点的理论位置的坐标。

S2023: 建立如下公式 (2) 所示的第二线性关系方程：

$$\Delta r = J_p \Delta p \quad (2)$$

具体地，可以推导出拟合半径误差和接触点的位置误差存在如上述公式 (2) 所示的近似线性关系。其中， $\Delta r$  表示标准工件的拟合半径误差矩阵， $J_p$  表示第二雅格比矩阵， $\Delta p$  表示接触点的位置的误差矩阵。

S203: 结合第一线性关系方程和第二线性关系方程，建立该拟合半径误差与运动学参数误差之间的第三线性关系方程。

具体地，由于拟合半径误差可以计算得到，且拟合半径误差与接触点的位置误差之间存在第二线性关系方程，而接触点的位置误差与运动学参数误差之间存在第一线性关系方程，因此结合第一线性关系方程和第二线性关系方程，可以建立该拟合半径误差与运动学参数误差之间的第三线性关系方程。

可选地，当第一线性关系方程为上述公式 (1)，第二线性关系方程为上述公式 (2) 时，如图 6 所示，步骤 S203 包括：

S2031: 将第一线性关系方程代入第二线性关系方程，得到如下公式 (3) 所示的第三线性关系方程：

$$\Delta r = J \Delta DH \quad (3)$$

其中， $J = J_p J_{DH}$ 。

其中，上述步骤 S201~S203 只需要执行一次，其执行过程只需要在步骤 S133

之前即可，得到该第三线性关系方程后，只需要将对应数据代入即可以计算出所需的参数。

继续参阅图 5，步骤 S133 具体包括：

S204：将拟合半径误差代入该第三线性关系方程中，求解该第三线性关系方程，以得到标定机器人的实际运动学参数。

当得到该第三线性关系方程和拟合半径误差后，则可以将拟合半径误差代入该第三线性关系方程中，求解该第三线性关系方程，则可以计算得到标定机器人的运动学参数误差。然后，由于标定机器人的名义运动学参数可以事先得到，利用该名义运动学参数叠加该运动学参数误差，则可以得到标定机器人的实际运动学参数。

其中，当参数较多时，线性方程利用矩阵运算可以方便快速地求解，因此，如图 6 所示，步骤 S204 可以包括：

S2041：求解第三线性关系方程，得到标定机器人的运动学参数的误差矩阵。

其中，该标定机器人的运动学参数的误差矩阵为标定机器人的名义 DH 参数和实际 DH 参数的误差形成的矩阵。

S2042：将标定机器人的名义运动学参数和运动学参数的误差矩阵叠加，得到标定机器人的实际运动学参数。

具体地，该第三线性关系方程可以采用如公式 (3) 所示的矩阵等式，此时，利用矩阵逆运算，则可以得到该第三线性关系方程的解，即可以得到标定机器人的运动学参数的误差矩阵，然后，根据该运动学参数的误差矩阵与标定机器人的名义运动学参数进行运算，则可以得到标定机器人的实际运动学参数。

本实施例中，预先建立拟合半径误差与运动学参数误差之间的第三线性关系方程之后，只需要在得到拟合半径误差后，将该拟合半径误差代入该第三线性关系方程，利用矩阵逆运算，则可以简单快捷地计算得到该标定机器人的实际运动学参数。

如图 7 所示，本申请机器人运动学参数自标定系统第一实施例包括：标定

机器人 A 和参考机器人 B。

其中，标定机器人 A 的法兰安装有末端执行器 10，参考机器人 B 的法兰安装有标准工件 20。

该参考机器人 B 用于改变标准工件 20 的位姿。

该标定机器人 A 用于执行指令以实现本申请机器人运动学参数自标定方法第一或第二实施例所提供的方法。

其中，标定的运动学参数个数与标定机器人 A 的类型相关。本实施例中，该标定机器人 A 可以选用六轴串联机器人。

为了使得标定机器人 A 可以接触到标准工件 20 表面 201 的不同位置，该标定机器人 A 和参考机器人 B 相对设置，从而使得标定机器人 A 和参考机器人 B 的灵巧工作空间有较大的重合，也就是使得二者机械臂的移动空间重合度较大，例如重合度达到至少 60%。

为了满足标定精度的要求，该标定机器人 A 的末端执行器 10 可以选用重复精度小于或等于 1 $\mu$ m 的机床测头，该标准工件 20 可以选用有较高的球面度和表面光滑度的三坐标检具标准球。

本实施例的机器人运动学参数自标定系统中，利用法兰上安装有标准工件的参考机器人辅助标定，标定工具简单，效率高，且在标定时，只需一次输入标定机器人和参考机器人的运动指令，标定过程中标定机器人和参考机器人即可以自动运动和计算，无需人工干预，所以标定自动化程度高，适用于机器人生产过程中大批量的标定需求。

如图 8 所示，本申请机器人运动学参数自标定系统第二实施例的结构与本申请机器人运动学参数自标定系统第一实施例的结构类似，不同之处在于，进一步包括：控制装置 C，连接标定机器人 A 和参考机器人 B，用于控制标定机器人 A 和参考机器人 B 的运动。

其中，该控制装置 C 可以是计算机、后台服务器或总控制器等控制设备，其可以向标定机器人 A 和参考机器人 B 输出控制指令，控制标定机器人 A 和参

考机器人 B 的运动。

此外,该控制装置 C 还可以存储标定机器人 A 和参考机器人 B 的运动数据,如各轴的角度值等。该控制装置 C 还可以接收用户或控制人员的操控指令,以根据该操控指令控制标定机器人 A 和参考机器人 B 的运动。

如图 9 所示,本申请存储装置一实施例中,存储装置 90 内部存储有程序文件 901,该程序文件 901 被执行可实现如本申请机器人运动学参数自标定方法第一或第二实施例所提供的方法。

其中,该存储装置 90 可以是便携式存储介质如 U 盘、光盘,也可以是其他存储设备如硬盘等,还可以是服务器、移动终端、机器人或可集成于上述设备中的独立部件,例如主控芯片等。

本实施例中,存储装置中存储的程序被执行时,利用法兰上安装有标准工件的参考机器人辅助标定,标定工具简单,效率高,且在标定时,只需一次输入标定机器人和参考机器人的运动指令,标定过程中标定机器人和参考机器人即可以自动运动和计算,无需人工干预,所以标定自动化程度高,适用于机器人生产过程中大批量的标定需求。

以上所述仅为本申请的实施方式,并非因此限制本申请的专利范围,凡是利用本申请说明书及附图内容所作的等效结构或等效流程变换,或直接或间接运用在其他相关的技术领域,均同理包括在本申请的专利保护范围内。

## 权利要求书

1. 一种机器人运动学参数自标定方法，其特征在于，包括：

标定机器人将末端执行器多次接触标准工件表面，并记录每次接触时所述标定机器人各轴的角度，所述标准工件安装于参考机器人的法兰；

所述参考机器人改变所述标准工件的位姿，所述标定机器人重复执行以所述末端执行器多次接触标准工件表面，并记录每次接触时所述标定机器人各轴的角度步骤，以获取所述标定机器人的多组轴角度值；

利用所述多组轴角度值、所述标定机器人的名义运动学参数以及所述标准工件的实际半径，得到所述标定机器人的实际运动学参数。

2. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述标定机器人的末端执行器多次接触标准工件表面，并记录每次接触时所述标定机器人各轴的角度包括：

所述标定机器人的末端执行器以不同姿态接触所述标准工件表面的不同位置  $m$  次，并记录每次接触时所述标定机器人各轴的角度。

3. 根据权利要求2所述的方法，其特征在于，所述参考机器人改变所述标准工件的位姿，所述标定机器人重复执行以所述末端执行器多次接触标准工件表面，并记录每次接触时所述标定机器人各轴的角度步骤，以获取所述标定机器人的多组轴角度值包括：

所述参考机器人改变所述标准工件的位姿  $n-1$  次；

每改变一次所述标准工件的位姿，所述标定机器人将末端执行器以不同姿态接触所述标准工件表面的不同位置，并记录每次接触时所述标定机器人各轴的角度，以得到  $m*n$  组所述标定机器人各轴的角度。

4. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述利用所述多组轴角度值、所述标定机器人的名义运动学参数以及所述标准工件的实际半径，得到所述标定机器人的实际运动学参数包括：

利用所述多组轴角度值和所述标定机器人的名义运动学参数，计算得到每



组所述轴角度值对应的所述末端执行器与所述标准工件表面的接触点理论位置，其中在所述标准工件的同一位姿下记录得到的所述标定机器人各轴的角度形成一组所述轴角度值；

利用多组所述接触点理论位置，拟合得到每组所述接触点理论位置对应的所述标准工件的拟合半径，其中以一组所述轴角度值计算得到的多个所述接触点理论位置为一组所述接触点理论位置；

根据所述拟合半径以及实际半径之间的拟合半径误差计算所述实际运动学参数。

5. 根据权利要求4所述的方法，其特征在于，

所述根据所述拟合半径以及实际半径之间的拟合半径误差计算所述实际运动学参数之前，包括：

建立所述接触点的位置误差与运动学参数误差之间的第一线性关系方程，其中所述运动学参数误差为所述实际运动学参数与所述名义运动学参数之间的误差；

建立所述拟合半径误差与所述接触点的位置误差之间的第二线性关系方程；

结合所述第一线性关系方程和所述第二线性关系方程，建立所述拟合半径误差与所述运动学参数误差之间的第三线性关系方程；

所述根据所述拟合半径以及实际半径之间的拟合半径误差计算所述实际运动学参数包括：

将所述拟合半径误差代入所述第三线性关系方程中，求解所述第三线性关系方程，以得到所述标定机器人的实际运动学参数。

6. 根据权利要求5所述的方法，其特征在于，所述建立所述接触点的位置误差与运动学参数误差之间的第一线性关系方程包括：

将所述接触点的理论位置 and 实际位置的差作为元素，建立所述接触点的位置的误差矩阵；

将所述名义运动学参数和所述实际运动学参数的差作为元素，建立所述运

动学参数的误差矩阵；

获取所述接触点的理论位置关于所述运动学参数的第一雅格比矩阵；

建立如下公式所示的所述第一线性关系方程：

$$A_p = J_{dh} ADH ;$$

其中， $A_p$ 表示所述接触点的位置的误差矩阵， $J_{DH}$ 表示所述第一雅格比矩阵， $AD/f$ 表示所述运动学参数的误差矩阵。

7. 根据权利要求6所述的方法，其特征在于，所述建立所述标准工件的拟合半径误差与所述接触点的位置误差之间的第二线性关系方程包括：

将所述标准工件的拟合半径与所述实际半径之差作为元素，建立所述标准工件的拟合半径误差矩阵；

获取所述标准工件的拟合半径关于所述接触点的理论位置的第二雅格比矩阵；

建立如下公式所示的所述第二线性关系方程：

$$A_r = J_p A_p ;$$

其中， $A_r$ 表示所述标准工件的拟合半径误差矩阵， $J_p$ 表示所述第二雅格比矩阵， $A_p$ 表示所述接触点的位置的误差矩阵。

8. 根据权利要求7所述的方法，其特征在于，所述结合所述第一线性关系方程和所述第二线性关系方程，建立所述标准工件的拟合半径误差与所述运动学参数误差之间的第三线性关系方程包括：

将所述第一线性关系方程代入所述第二线性关系方程，得到如下公式所示的所述第三线性关系方程：

$$A_r = JADH ]$$

其中， $J = J_p J_{DH}$ 。

9. 根据权利要求5所述的方法，其特征在于，所述求解所述第三线性关系方程，以得到所述标定机器人的实际运动学参数包括：

求解所述第三线性关系方程，得到所述标定机器人的运动学参数的误差矩

阵；

将所述标定机器人的名义运动学参数和所述运动学参数的误差矩阵叠加，得到所述标定机器人的实际运动学参数。

10. 根据权利要求 1-9 任一项所述的方法，其特征在于，所述标定机器人和所述参考机器人相对设置。

11. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述标定机器人为六轴串联机器人，所述  $m$  的取值大于 4。

12. 根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述标定机器人为六轴串联机器人，所述  $n$  的取值大于 20。

13. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述标准工件为三坐标检具标准球。

14. 一种机器人运动学参数自标定系统，其特征在于，包括：标定机器人和参考机器人；

所述标定机器人的法兰安装有末端执行器，所述参考机器人的法兰安装有标准工件；

所述参考机器人用于改变所述标准工件的位姿；

所述标定机器人用于执行指令以实现如权利要求 1-13 任一项所述的机器人运动学参数自标定方法。

15. 根据权利要求 14 所述的系统，其特征在于，所述标定机器人和所述参考机器人相对设置。

16. 根据权利要求 14 所述的系统，其特征在于，所述标定机器人的末端执行器为重复精度小于或等于 1 微米的机床测头。

17. 根据权利要求 14 所述的系统，其特征在于，所述标准工件为三坐标检具标准球。

18. 根据权利要求 14 所述的系统，其特征在于，进一步包括：控制装置，连接所述标定机器人和所述参考机器人，用于控制所述标定机器人和所述参考

机器人的运动。

19. 根据权利要求 14 所述的系统，其特征在于，所述标定机器人为六轴串联机器人。

20. 一种存储装置，内部存储有程序文件，其特征在于，所述程序文件被执行以实现如权利要求 1-13 任一项所述的机器人运动学参数自标定方法。

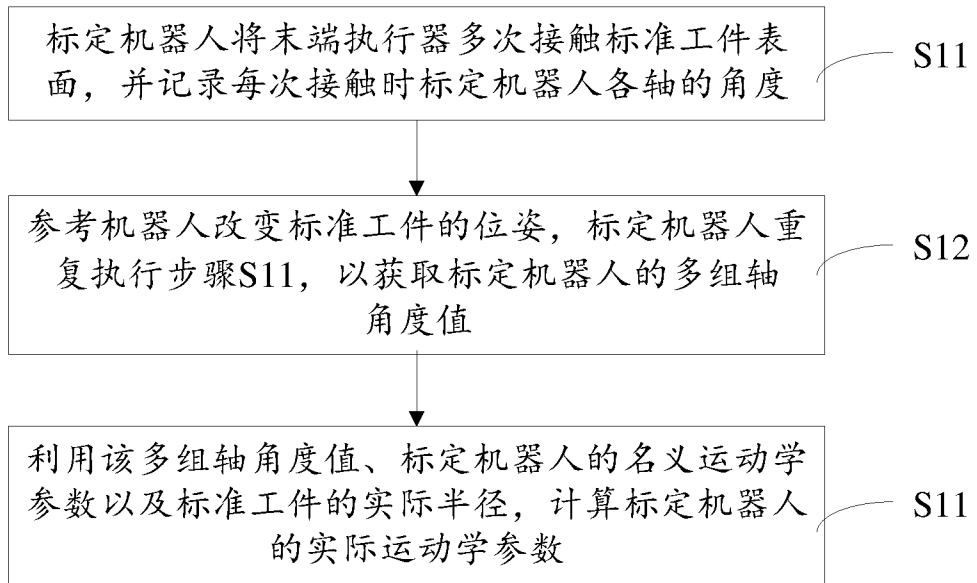


图 1

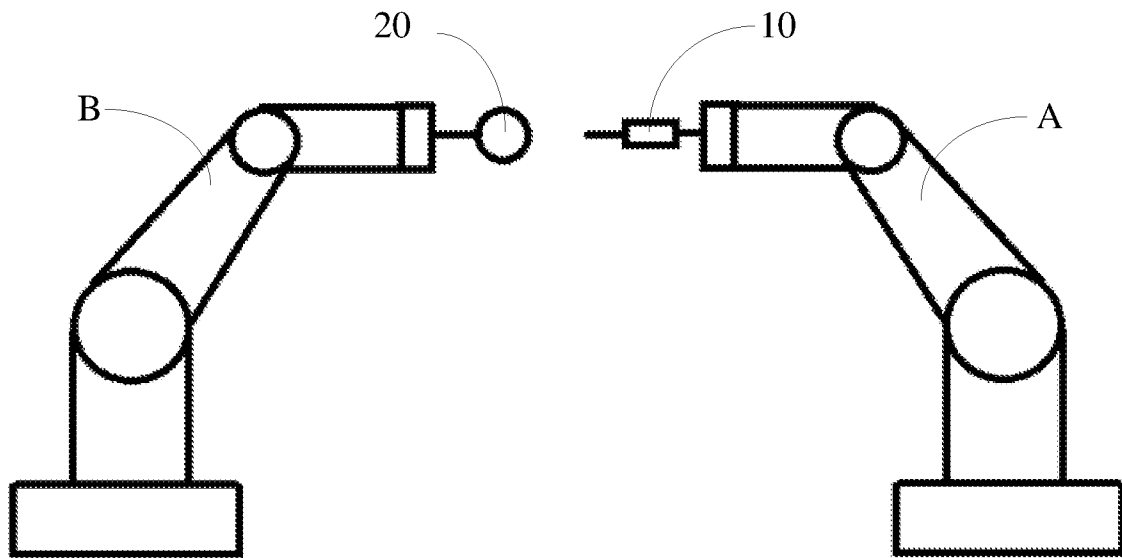
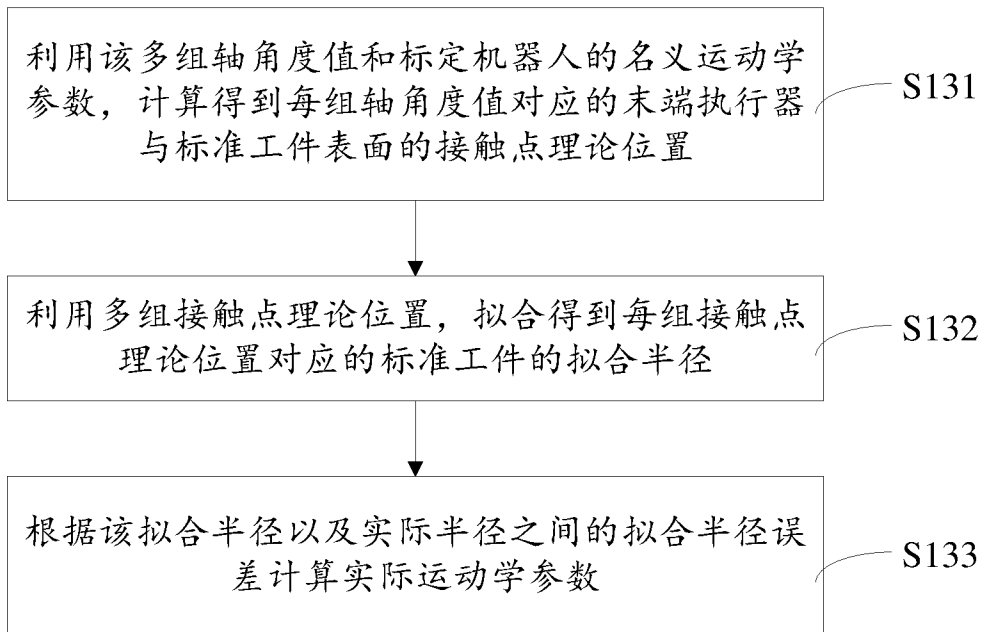
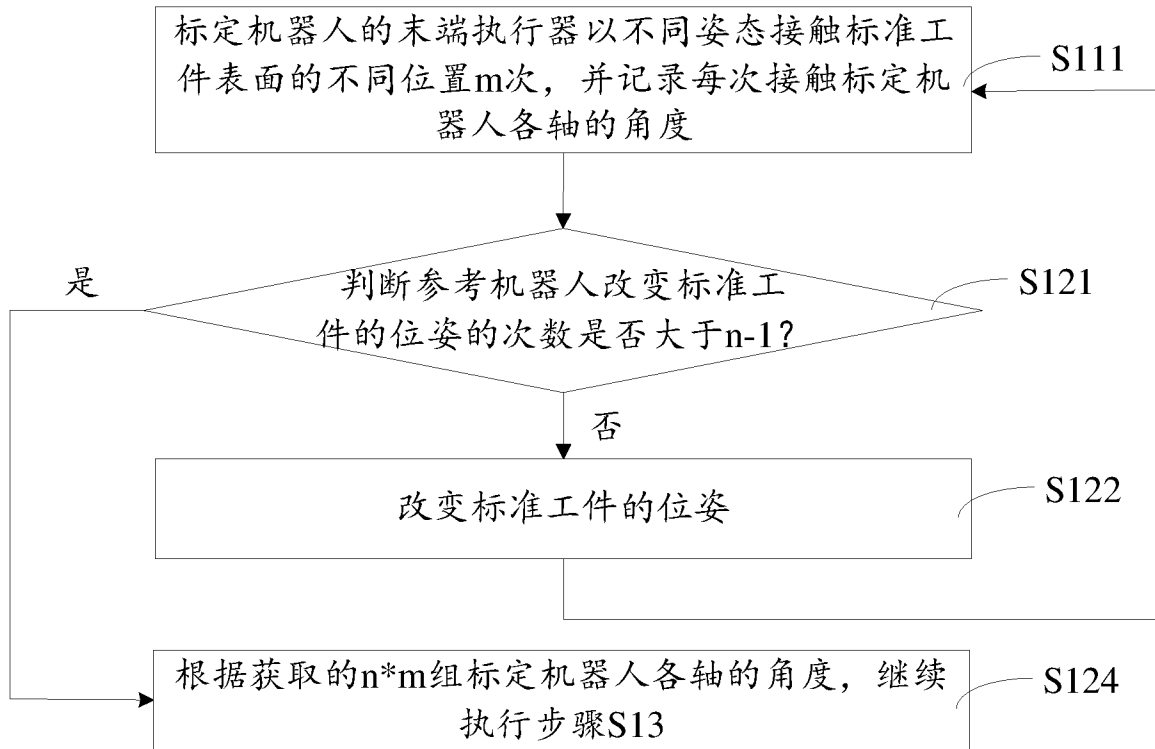


图 2



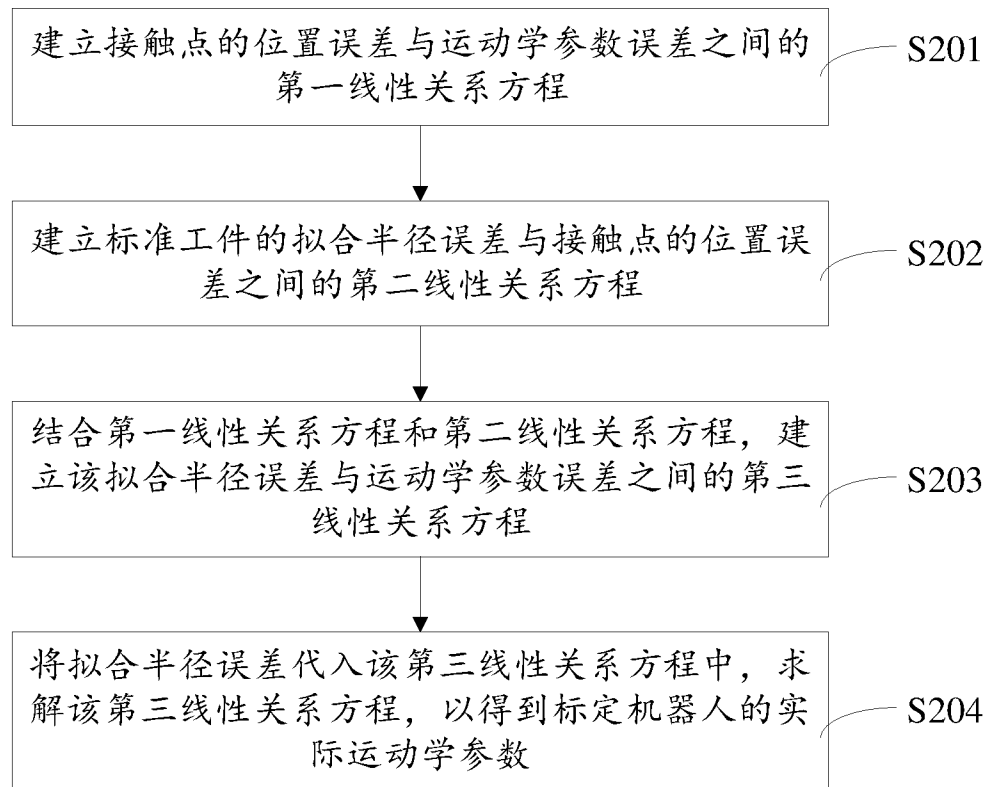


图 5



图 6



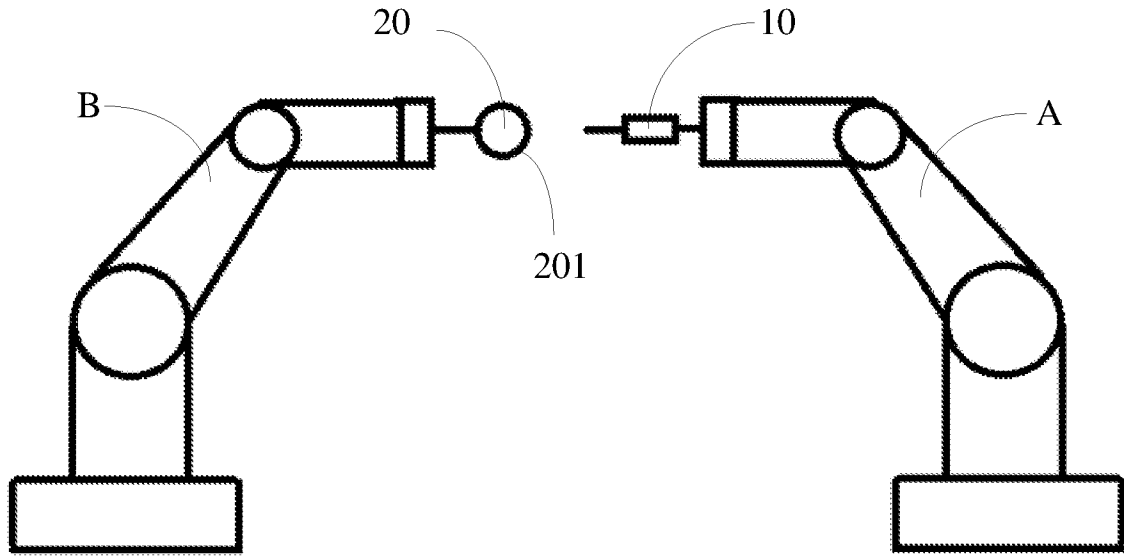


图 7

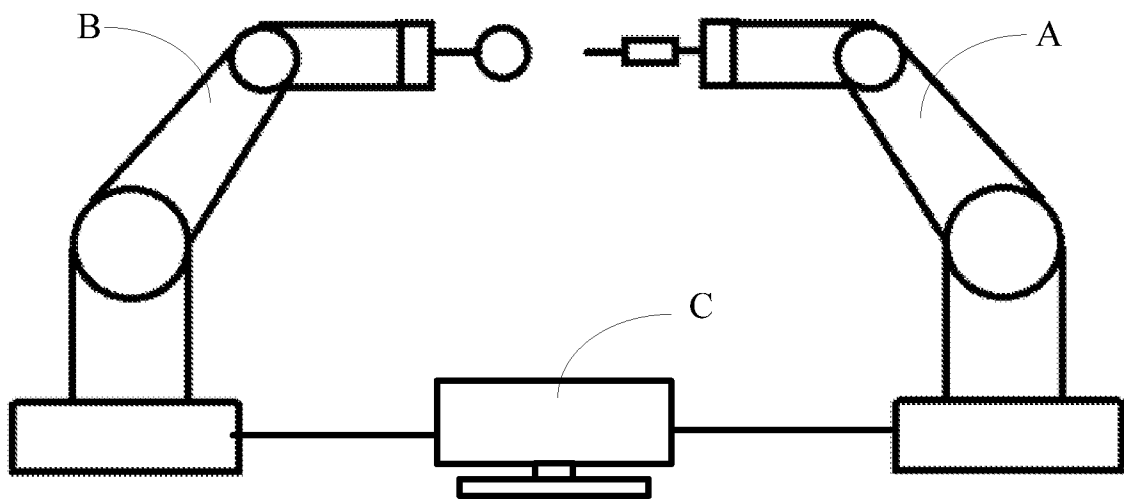


图 8

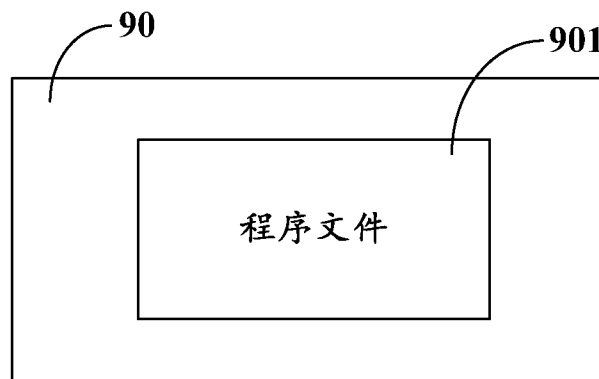


图 9

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/088251

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
B25J 9/00(2006.01)i ; B25J 19/00(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B25J; G01B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) cnabs, cnpat, dwpi 机器人 运动学 ,参数 ,标定 ,工件 ,角度 robot, kinematics, parameter, workpiece, angle, calibrat+		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 108346165 A (SHENZHEN ESUN EXHIBITION COMPANY LIMITED et al.) 31 July 2018 (2018-07-31) description, pages [0003]-[0014], figures 1-16	1-20
A	CN 102022989 A (SHANDONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 20 April 2011 (2011-04-20) entire document	1-20
A	CN 108972543 A (NANJING SUNRISE NUMERICAL CONTROL TECH CO., LTD.) 11 December 2018 (2018-12-11) entire document	1-20
A	CN 105666490 A (KUNMING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 15 June 2016 (2016-06-15) entire document	1-20
A	CN 103968761 A (ZHONGKE HUAHE BEIJING TECHNOLOGY CO., LTD.) 06 August 2014 (2014-08-06) entire document	1-20
A	US 4725965 A (AMERICAN TELEPHONE & TELEGRAPH CO) 16 February 1988 (1988-02-16) entire document	1-20
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search <b>04 September 2019</b>		Date of mailing of the international search report <b>19 February 2020</b>
Name and mailing address of the ISA/CN <b>China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088 China</b> Facsimile No. (86-10)62019451		Authorized officer  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2019/088251**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108346165	A	31 July 2018	None			
CN	102022989	A	20 April 2011	None			
CN	108972543	A	11 December 2018	None			
CN	105666490	A	15 June 2016	None			
CN	103968761	A	06 August 2014	None			
US	4725965	A	16 February 1988	JP	S6344206	A	25 February 1988

<p><b>A. 主题的分类</b></p> <p>B25J 9/00(2006.01)i; B25J 19/00(2006.01)i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																							
<p><b>B. 检索领域</b></p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>B25J; G01B</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>cnabs, cnpat, dwpi 机器人, 运动学, 参数, 标定, 工件, 角度 robot, kinematics, parameter, workpiece, angle, calibrat+</p>																							
<p><b>C. 相关文件</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 108346165 A (深圳市易尚展示股份有限公司 等) 2018年 7月 31日 (2018 - 07 - 31) 说明书第3-14页, 附图1-16</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102022989 A (山东科技大学) 2011年 4月 20日 (2011 - 04 - 20) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108972543 A (南京旭上数控技术有限公司) 2018年 12月 11日 (2018 - 12 - 11) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105666490 A (昆明理工大学) 2016年 6月 15日 (2016 - 06 - 15) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103968761 A (中科华赫北京科技有限责任公司) 2014年 8月 6日 (2014 - 08 - 06) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 4725965 A (AMERICAN TELEPHONE &amp; TELEGRAPH CO) 1988年 2月 16日 (1988 - 02 - 16) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> </tbody> </table>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 108346165 A (深圳市易尚展示股份有限公司 等) 2018年 7月 31日 (2018 - 07 - 31) 说明书第3-14页, 附图1-16	1-20	A	CN 102022989 A (山东科技大学) 2011年 4月 20日 (2011 - 04 - 20) 全文	1-20	A	CN 108972543 A (南京旭上数控技术有限公司) 2018年 12月 11日 (2018 - 12 - 11) 全文	1-20	A	CN 105666490 A (昆明理工大学) 2016年 6月 15日 (2016 - 06 - 15) 全文	1-20	A	CN 103968761 A (中科华赫北京科技有限责任公司) 2014年 8月 6日 (2014 - 08 - 06) 全文	1-20	A	US 4725965 A (AMERICAN TELEPHONE & TELEGRAPH CO) 1988年 2月 16日 (1988 - 02 - 16) 全文	1-20
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
A	CN 108346165 A (深圳市易尚展示股份有限公司 等) 2018年 7月 31日 (2018 - 07 - 31) 说明书第3-14页, 附图1-16	1-20																					
A	CN 102022989 A (山东科技大学) 2011年 4月 20日 (2011 - 04 - 20) 全文	1-20																					
A	CN 108972543 A (南京旭上数控技术有限公司) 2018年 12月 11日 (2018 - 12 - 11) 全文	1-20																					
A	CN 105666490 A (昆明理工大学) 2016年 6月 15日 (2016 - 06 - 15) 全文	1-20																					
A	CN 103968761 A (中科华赫北京科技有限责任公司) 2014年 8月 6日 (2014 - 08 - 06) 全文	1-20																					
A	US 4725965 A (AMERICAN TELEPHONE & TELEGRAPH CO) 1988年 2月 16日 (1988 - 02 - 16) 全文	1-20																					
<p><input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p>																							
<p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件</p> <p>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利</p> <p>“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)</p> <p>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件</p> <p>“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</p> <p>“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件</p> <p>“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性</p> <p>“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性</p> <p>“&amp;” 同族专利的文件</p>																							
<p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2019年 9月 4日</p>		<p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2020年 2月 19日</p>																					
<p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088</p> <p>传真号 (86-10)62019451</p>		<p>授权官员</p> <p>宋轶群</p> <p>电话号码 86-10-62085415</p>																					

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号  
PCT/CN2019/088251

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	108346165	A	2018年 7月 31日	无	
CN	102022989	A	2011年 4月 20日	无	
CN	108972543	A	2018年 12月 11日	无	
CN	105666490	A	2016年 6月 15日	无	
CN	103968761	A	2014年 8月 6日	无	
US	4725965	A	1988年 2月 16日	JP S6344206 A	1988年 2月 25日